نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۰۱-۱۵۸۷

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1587-1601

تحلیل پایداری کمی سامانه‌ی آبخوان
(مطالعه موردی: خراسان جنوبی- آبخوان بیرجند)

حمید کاردان مقدم[۱]- محمد ابراهیم بنی حبیب[۲*]- سامان جوادی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

چکیده

استفاده از راهکارهای طرح تعادل بخشی به عنوان یکی از مهمترین گزینه‌های کاهش و تعدیل بحران منابع آب زیرزمینی بوده و رسیدن به یک تراز آب مطلوب و پایدار در آبخوان‌ها به عنوان هدف اصلی این راهکار مطرح می‌باشد. تراز مطلوب آب زیرزمینی با توجه به هدف طرح تعادل‌بخشی آبخوان، برگشت سامانه به تراز اولیه‌ی آب و جبران کمبود منابع آب زیرزمینی است. جهت نیل به این هدف می‌بایست سناریوهای تعادل‌بخشی و پایداری سیستم آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های مناسب ارزیابی گردند. بدین منظور در مقاله حاضر، سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت پیشنهاد گردیده و این شاخص‌ها جهت ارزیابی میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف تعادل‌بخشی بصورت یکپارچه و توزیعی محاسبه شد. در این تحقیق از راهکار کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی که یکی از اصلی‌ترین پروژه‌های طرح تعادل‌بخشی است، در ۶ سطح کاهش ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برداشت آب کشاورزی بصورت سالانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل MODFLOW و اعمال سناریوهای طرح تعادل‌بخشی نشان داد که با کاهش برداشت آب، شاخص پایداری سیستم افزایش یافته و از بهبود ۳۲ درصدی در سناریوی یک درصد کاهش برداشت به ۸۸ درصد در سناریوی ۳/۵ درصد کاهش برداشت می‌رسد. همچنین بررسی شاخص پایداری سیستم در سناریوهای مختلف نیز نشان داد که کاهش ۲/۵ درصدی برداشت آب، وضعیت آبخوان را به حالت پایداری خواهد رساند. شاخص ارائه شده در این تحقیق با توجه به قابلیت توزیعی بودن و امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف، در سایر آبخوان‌ها نیز می‌تواند استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، اعتمادپذیری، تراز مطلوب، شاخص پایداری سیستم، مطلوبیت

مقدمه

در دو دهه اخیر تحت تأثیر تنش‌های محیطی و اقلیمی برداشت از منابع آب زیرزمینی رشد قابل توجهی داشته (۱۹)، که سبب افت شدید سطح سفره‌های آب زیرزمینی بخصوص در مناطق خشک شده است. با توجه به افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی، مدیریت برداشت از این منابع و کنترل سطح برداشت بسیار مهم بوده و بسیاری از سناریوهای تعادل‌بخشی آبخوان برای تامین این هدف مطرح شده‌اند. مدیریت آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان با تغییرات اقلیم، رشد اقتصادی- اجتماعی و حکمرانی نامناسب آب، مختل شده است (۴). مصرف آب بدون برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی بخصوص در مناطق خشک که تنها منبع تأمین آن منابع زیرزمینی هستند، سبب افت شدید این منابع شده است. متولیان آب کشور را بر آن داشته تا طرح‌های تعادل‌بخشی و برون رفت از بحران آب زیرزمینی را ارائه دهند. ارائه سناریوهای مختلف جهت تعادل بخشی بدون توجه به میزان اثرگذاری و ارزیابی پایداری آبخوان نمی‌تواند موجب بهبود مدیریت آبخوان شود.

مطالعات مختلفی در زمینه شاخص ارائه شده است که از آن جمله شاخص CWSI[۴] (۱۴)، شاخص پایداری WSI[۵] (۲) شاخص WJWSI[۶] (۶) و شاخص جامع خشکسالی (۱۵) را می توان نام برد که در این تحقیقات پایداری منابع آب تعریف نشده است. پاندی و همکاران در سال ۲۰۰۷ (۱۳) به منظور بررسی و توسعه پایدار در بخش آب زیرزمینی از یک چارچوب ۵ بخشی که شامل پایش آب

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری منابع آب، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: Email:banihabib@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v31i6.66959

4- Canadian Water Sustainability Index
5- Watershed sustainability index
6- West Java water sustainability index

زیرزمینی، تولید دانش و انتشار، تنظیم مقررات، مشارکت عمومی و مسئولیت سازمانی بود، استفاده کرد. براساس این ۵ بخش پارامترهای تغییرات در سیستم آب زیرزمینی منطقه دره کاتماندو را براساس تغییرات حجم مخزن و رضایت‌مندی اجتماعی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که وضعیت منابع آب زیرزمینی بحرانی بوده و تقویت زیرساخت‌ها جهت سیاست‌گذاری توسعه پایدار منطقه ضروری است. مازا و همکاران در سال ۲۰۱۴ (۸) پایداری آبخوان را در یک دوره زمانی در جنوب ایتالیا به عنوان شاخص مطمئن برای برداشت آب از آبخوان معرفی کردند. در این مطالعه حساسیت شاخص برداشت مطمئن آب با استفاده از پارامترهای مختلف مؤثر در بیلان آب منطقه مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج نشان داد که تغذیه از بارندگی و رواناب مهمترین پارامترهای ورودی به منطقه جهت برداشت مطمئن معرفی شد. علیمنتی و لمباردی در سال ۲۰۱۵ (۱) حداکثر دبی قابل برداشت را به عنوان یک شاخص کمی برای پایداری آبخوان معرفی کردند. با توجه به ورودی‌های آماری، تعادل بین عرضه و تقاضا را لازمه برقراری اطمینان‌پذیری آبخوان معرفی کردند. شاهدی و طالبی در سال ۲۰۱۴ (۱۸)، چهار شاخص فالکن مارک برای آب تجدیدپذیر حوضه، نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر، حداکثر اراضی فاریاب و شاخص تجاوز سطح اراضی فاریاب را به عنوان شاخص‌های تعادل منابع آب و توسعه پایدار در حوضه قره‌قوم معرفی کردند. صفوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ (۱۶) استفاده از توابع عضویت فازی جهت استفاده در شاخص‌های کارایی سیستم منابع آب را جهت بهبود عملکرد معیارها ارائه دادند. آنها با بررسی میزان تأمین و نیاز آب در محدوده حوزه زاینده‌رود، با بررسی میزان کمبود آب در بخش‌های مختلف حوزه، از شاخص هاشیموتو (آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری) جهت بررسی میزان عملکرد سیستم در دوره‌های مختلف استفاده کردند. برای بهبود دقت برآورد شاخص‌ها از توابع عضویت فازی جهت افزایش دقت استفاده کردند (۱۶). استفاده شاخص، جهت کمی کردن یک سیستم بکار برده می‌شود و جهت ارزیابی یک سیستم منابع آب شاخص انعطاف‌پذیری ارائه شده است. مطالعات زیادی در خصوص کارایی سیستم‌های منابع آب با استفاده از شاخص انعطاف‌پذیری[1] ارائه شده است. بررسی، تحلیل و ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب (مخازن سد)، با استفاده از روابط ارائه شده توسط هاشیموتو[2] و همکاران در سال ۱۹۸۲ (۵) مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، شاخص انعطاف‌پذیری ارائه شده توسط هاشیموتو با توجه به عدم درنظرگرفتن ساختار آبخوان، تفاوت زمانی در تغذیه و تخلیه آبخوان و تأثیرپذیر بودن آبخوان به این عوامل را نمی‌توان بصورت مناسب در ارزیابی سیستم آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. بررسی منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سیستماتیک بودن آبخوان و استفاده از شاخص، جهت ارزیابی پایداری یا انعطاف‌پذیری سیستم آب زیرزمینی تاکنون انجام نشده است. پایداری یا انعطاف‌پذیری در سیستم آبخوان به مفهوم کمی کردن ظرفیت سیستم به منظور حداقل رساندن آسیب به آبخوان است.

در این مطالعه، با اصلاح شاخص انعطاف‌پذیری پیشنهادی هاشیموتو و همکاران، شاخص جدید پایداری برای ارزیابی سیستم آب زیرزمینی پیشنهاد شده و تأثیر سناریوهای طرح تعادل‌بخشی در آبخوان با استفاده از شاخص پایداری آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

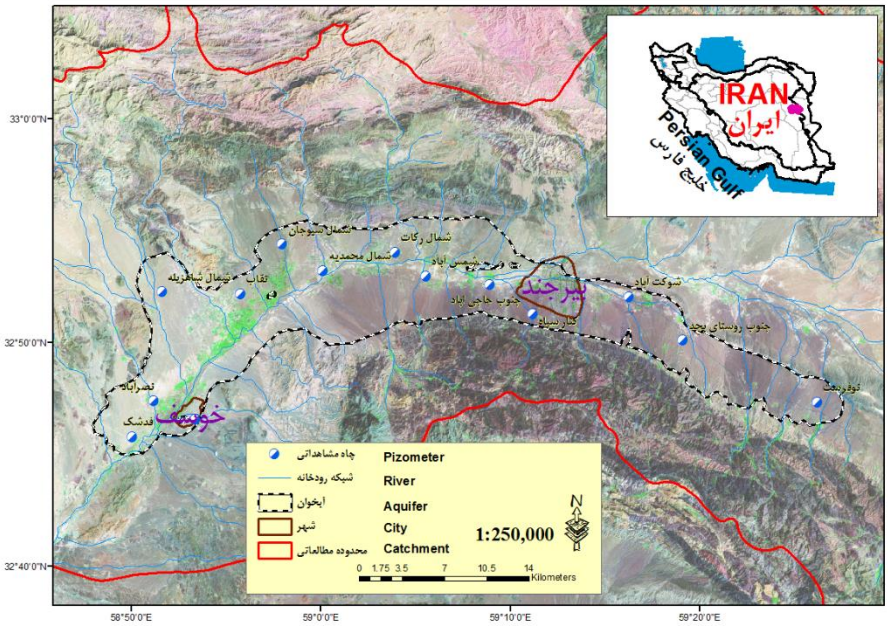
منطقه مورد مطالعه

آبخوان بیرجند، در محدوده مطالعاتی (۴۶۱۶) بیرجند در حوزه کویر لوت در شرق ایران به عنوان یک منطقه راهبردی مرزی می‌باشد. این آبخوان با مساحت ۴۲۸/۹ کیلومتر مربع، با میانگین بارندگی ۱۷۰ میلی‌متر در یک اقلیم خشک و سرد قرار دارد. سازند زمین‌شناسی آبخوان بیرجند از نوع کواترنر با متوسط ضخامت آبخوان ۷۵ متر می‌باشد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی، از شمال به طرف جنوب و در ادامه بطرف غرب آبخوان است. میانگین ضخامت اشباع آبخوان حدود ۲۵ متر برآورد شده است (۱۱). شکل (۱) موقعیت آبخوان، محدوده مطالعاتی و شکل (۲) تغییرات حجم آبخوان و افت آب زیرزمینی را طی یک دوره ۲۰ ساله تا سال آبی ۹۴-۱۳۹۳نشان می‌دهد. بیش از ۱۲ میلیون متر مکعب در طی این دوره زمانی از حجم استاتیک آبخوان آب برداشت شده که سبب شده این آبخوان بصورت ممنوعه و بحرانی از سوی شرکت آب منطقه‌ای معرفی شود (۱۱).

تعادل‌بخشی آبخوان

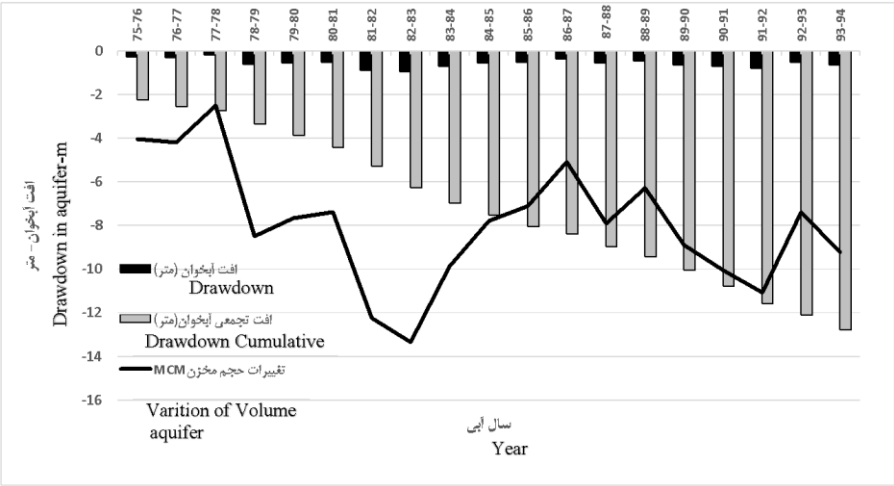
برداشت‌های بی‌رویه از آب زیرزمینی بخصوص در طی ۱۵ سال اخیر، سبب کاهش حجم استاتیک آبخوان‌های کشور به میزان ۷۵ میلیارد متر مکعب تا پایان سال آبی ۹۱-۹۰ شده است (۱۱). این کاهش حجم با ۳۵ میلیارد متر مکعب اضافه برداشت قبل از سال ۷۶ برآورد ۱۱۰ میلیارد متر مکعب برداشت مازاد از سفره‌های آب زیرزمینی را در برداشته است (۱۲). این موضوع سبب خشک شدن بسیاری از منابع آب زیرزمینی، رودخانه‌ها، تالاب‌ها، باغات و اراضی کشاورز، افت کیفی منابع آب زیرزمینی، نشست زمین، بلااستفاده بیش از ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر شبکه آبفا، مهاجرت و حاشیه نشینی، به خطر افتادن امنیت سیاسی، افزایش مصرف انرژی و سایر پیامدها را داشته است (۱۲).

1- Reliability
2- Hashimoto



شکل ۱- موقعیت آبخوان و محدوده مطالعاتی بیرجند

Figure 1- Case study of Birjand aquifer



شکل ۲- تحلیل وضعیت افت و تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی

Figure 2- Analyst of losses and groundwater volume

به منظور تسریع در مدیریت این وضعیت، برنامه تعادل‌بخشی زیرنظر وزارت نیرو در ۱۵ پروژه کلان ملی با هدف تأمین و بازگشت حجم استاتیک سفره‌های آب زیرزمینی آغاز شده است (۱۲). هدف چند پروژه طرح تعادل‌بخشی، کاهش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد که به طرق خرید چاه‌های کم بازده کشاورزی، کنترل، نظارت و مسلوب‌المنفعه نمودن چاه‌های فاقد پروانه مضر و جایگزینی پساب با چاه‌های کشاورزی در دشت‌های ممنوعه از آن جمله است (۱۲). این پروژه‌ها در صورت اجرایی شدن سبب کاهش حجم برداشت فعلی از منابع آب زیرزمینی می‌شوند و می‌توانند حجم قابل توجهی آب را به سفره‌ی آب زیرزمینی برگردانند. براساس برآوردهای انجام شده حجمی بالغ بر ۴۴ درصد از هدف احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها با استفاده از این سه پروژه در سطح کلان تأمین خواهد شد و مابقی براساس جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز، طرح‌های افزایش نفوذ آب انجام خواهد شد. در این مطالعه ضمن بررسی کاهش برداشت از سفره‌آب زیرزمینی که یکی از پروژه‌های طرح تعادل‌بخشی است، لزوم اثربخشی این سناریو بر

وضعیت آتی آبخوان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی

به منظور ارزیابی پایداری سیستم آب زیرزمینی، تعریف تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت مقایسه و برآورد شاخص امری مهم است. تراز مطلوب آب زیرزمینی، با توجه به هدف تعادل بخشی آبخوان، در یک برنامه بیست ساله تعریف شده است. بر اساس این طرح، تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌ها می‌بایست در طی بیست سال (چهار برنامه ۵ ساله) به تراز آب زیرزمینی اولیه برگردد (۱۲). برگشت تراز آب زیرزمینی به حالت اولیه براساس جبران ۱۱۰ میلیارد متر مکعب از کل کسری آبخوان‌های دارای بیلان منفی کشور و بطور متوسط سالانه ۵ میلیارد متر مکعب در برنامه تعادل‌بخشی در طی بیست سال تعریف شده است (۱۲).

بررسی هیدروگراف آبخوان و سری زمانی تراز آب زیرزمینی پیزومترها و آبخوان نشان می‌دهد که منحنی تراز آب زیرزمینی علاوه بر داشتن روند تراز آب در طی دوره زمانی، دارای یک رفتار نوسانی در زمان نیز می‌باشد، بطوری‌که تغییرات تراز آب زیرزمینی را در دوره زمانی نشان می‌دهد. رفتار نوسانی تراز آب زیرزمینی ناشی از افزایش تغذیه و کاهش برداشت آب در فصول مرطوب و افزایش بهره‌برداری و کاهش تغذیه در فصول خشک ناشی می‌شود. با توجه به نزدیکی رفتار تراز آب زیرزمینی با منحنی سری فوریه (رابطه ۱) می‌توان رفتار نوسانی تراز آب را با بسط یک تابع از نوع سری فوریه روی داده‌های تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داد (۳). هدف طرح تعادل‌بخشی رسیدن تراز آب زیرزمینی به تراز آب اولیه می‌باشد که نحوه رسیدن تراز آب در طی زمان اهمیت نداشته لذا در این مطالعه با توجه به روند تغییرات تراز آب و رفتار نوسانی در آبخوان در طی دوره‌ی آماری از سری زمانی فوریه برای تدوین سری زمانی تراز آب در هر چاه مشاهده‌ای و آبخوان استفاده شد. سری فوریه بسطی است که هر تابع متناوب را به صورت حاصل جمع تعدادی نامتناهی از توابع نوسانی ساده (سینوسی، کسینوسی و یا تابع نمایی مختلط) بیان می‌کند.

$$f(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos\ (nx)) + \sum_{n=1}^{\infty}(b_n \sin(nx)) \quad (۱)$$

$F(x)$ تابع سیگنال، a_0 اندازه سیگنال با فرکانس صفر و دو تابع سینوسی و کسینوسی، توابع نوسانی می‌باشد.

پایداری سیستم آب زیرزمینی

معیارهای عملکرد یک سیستم منابع آب براساس میزان تأمین نیاز آب برای کاربران آب در بخش‌های مختلف تعریف می‌شود. کارایی فنی یک سیستم منابع آب را می‌توان با استفاده از شاخص انعطاف‌پذیری مورد ارزیابی قرار داد. این شاخص ترکیبی از سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری بوده و برای ارزیابی کارایی سیستم‌های منابع آب پیشنهاد شده و بیشتر در مطالعات مختلف بهره‌برداری بهینه و پایدار از مخازن آب استفاده شده است (۶). اما در مطالعات آب‌های زیرزمینی، جهت ارزیابی بهره‌برداری پایدار آبخوان، این شاخص‌ها استفاده نشده است. بنابراین در این مطالعه شاخص‌های پایداری آبخوان شامل اعتمادپذیری، آسیب پذیری و مطلوبیت به عنوان شاخص‌های ارزیابی فنی پایداری سیستم آب زیرزمینی معرفی و استفاده می‌شود. شاخص اعتمادپذیری آبخوان، به این مفهوم است که سناریوی کاهش برداشت تا چه حد توانسته آبخوان را به حالت اولیه خود برگرداند. این برگشت به حالت اولیه آبخوان، براساس هدف طرح تعادل‌بخشی به عنوان تراز آب یا حجم آب است که هدف آن برگشت تراز آب زیرزمینی به تراز اولیه آن تا بیست سال آینده در برنامه ششم توسعه می‌باشد. براین اساس اعتمادپذیری کمی سیستم آبخوان برای هر سناریوی تعادل‌بخشی بصورت رابطه (۲) ارائه شده است (۵). در شکل (۳) مفهوم این شاخص با پیکان مشکی شماره یک نشان داده شده است و در هر یک از گام‌های زمانی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب قرار گیرد، محاسبه می‌شود.

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \quad (۲)$$

که در آن n_{EL} تعداد دوره‌هایی که تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب (تراز تعادل) باشد و N_{EL} تعداد کل دوره‌ها است.

آسیب‌پذیری بیانگر میزان کمبود (۹) در سیستم آب زیرزمینی می‌باشدکه شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند. این شدت شکست می‌تواند براساس میانگین ماکزیمم کمبودها در یک دوره متوالی شکست در سیستم یا احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین و یا میانگین شکست‌ها بیان شود (۷، ۵ و۱۰). میزان آسیب پذیری آبخوان از نقطه نظر کمی با استفاده از رابطه (۳) در آبخوان با توجه به تغییرات تراز آب آبخوان در طی دوره شبیه‌سازی محاسبه شده است. شکست یک سیستم آب زیرزمینی در اجرای سناریوی تعادل‌بخشی، براساس پایین‌تر بودن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز مطلوب تعریف می‌شود. شکل (۳) مفهوم آسیب‌پذیری را با توجه به پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۳) نشان می‌دهد (۵). براین اساس در گام‌های زمانی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب باشد سیستم آبخوان دارای کمبود می‌باشد که در شکل (۳) این فاصله یا کمبود با رنگ خاکستری نشان داده شده است.

$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^{n}(W_t - W_{Pr})} \quad (۳)$$

در این رابطه W_t تراز آب زیرزمینی مطلوب در هر گام زمانی، W_s

تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در هر دوره زمانی برای هر سناریو، W_{Pr} تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو و n تعداد دوره‌هایی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب قرار می‌گیرد. در شرایطی که تراز آب زیرزمینی بالاتر یا برابر با تراز مطلوب باشد مقدار $(W_s - W_t)$ صفر در نظر گرفته می‌شود.

استفاده از شاخص برگشت‌پذیری جهت ارزیابی یک سیستم آب زیرزمینی قابل تعریف نمی‌باشد. شاخص برگشت‌پذیری به مفهوم برگشت سیستم از حالت شکست به حالت پیروزی یا مطلوب است و در آب‌های زیرزمینی با توجه به نوسانات و روند کلی تراز آب، قابل ملموس نیست. تغییرات تراز آب در چاه‌های مشاهده‌ای برخلاف تراز آب در پشت یک سد، تابع سریعی از جریانات ورودی و خروجی نمی‌باشد. نرخ تغییرپذیری حجم سفره‌ی آب زیرزمینی نسبت به منحنی عرضه و تقاضا مربوط به بهره‌برداری از یک سد کم می‌باشد. بطورکلی مفهوم آبخوان به معنای یک مخزن دارای آب بوده و مشابه مخزن سد که در آن اضافه تامین نیاز آبی در یک گام زمانی سبب خشک شدن مخزن سد می‌شود نیست. این تغییرات کم سبب می‌شود تا مفهوم شکست و پیروزی کمتر قابل استفاده باشد و استفاده از مفهوم برگشت‌پذیری و رابطه ارائه شده برای آن، در بخش آب زیرزمینی صحیح نباشد. لذا بدین منظور با استفاده از این مفهوم، شاخص مطلوبیت آب زیرزمینی تعریف می‌شود. در این شاخص احتمال برگشت سیستم به حالت مطلوب تحت یک سناریو یا بدون اعمال سناریو به عنوان شاخص مطلوبیت سیستم معرفی می‌شود. با توجه به افت منابع آب زیرزمینی، به منظور جبران این کمبود آب، از سناریوی تعادل‌بخشی استفاده شد. اثر سناریو و میزان برگشت آب در آبخوان تا تراز مطلوب آب زیرزمینی، با استفاده از شاخص مطلوبیت مورد سنجش قرار گرفت. این شاخص برمبنای درصد برگشت تراز آب زیرزمینی تا تراز مطلوب در هر سناریو با استفاده از رابطه (۴) بدست می‌آید. در شکل (۳) مفهوم شاخص مطلوبیت نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود درصد بالا آمدن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و تراز مطلوب، به عنوان شاخص مطلوبیت با خط‌چین معرفی می‌شود.

$$\beta_{EL} = 100 * (\frac{R_{EL} - r_{EL}}{R_{EL} - R_{pr}}) \quad (۴)$$

در این رابطه r_{EL} بیانگر تراز آب زیرزمینی پس از افت، R_{EL} تراز آب زیرزمینی در تراز مطلوب و R_{pr} تراز آب زیرزمینی مشاهداتی یا پیش‌بینی شده (بدون اجرای سناریوی تعادل بخشی) می‌باشد. پس از برآورد سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت، شاخص پایداری سیستم برای هر سناریوی طرح تعادل بخشی را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) محاسبه کرد (۵). شاخص بدست آمده از رابطه (۵) بین صفر تا یک است. هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد میزان پایداری سیستم بیشتر خواهد بود. از این شاخص می‌توان جهت سهولت در مقایسه، ارزیابی و تصمیم‌گیری بین سناریوهای مختلف تعادل‌بخشی در تصمیم‌گیری و برنامه ریزی استفاده کرد (۱۷).

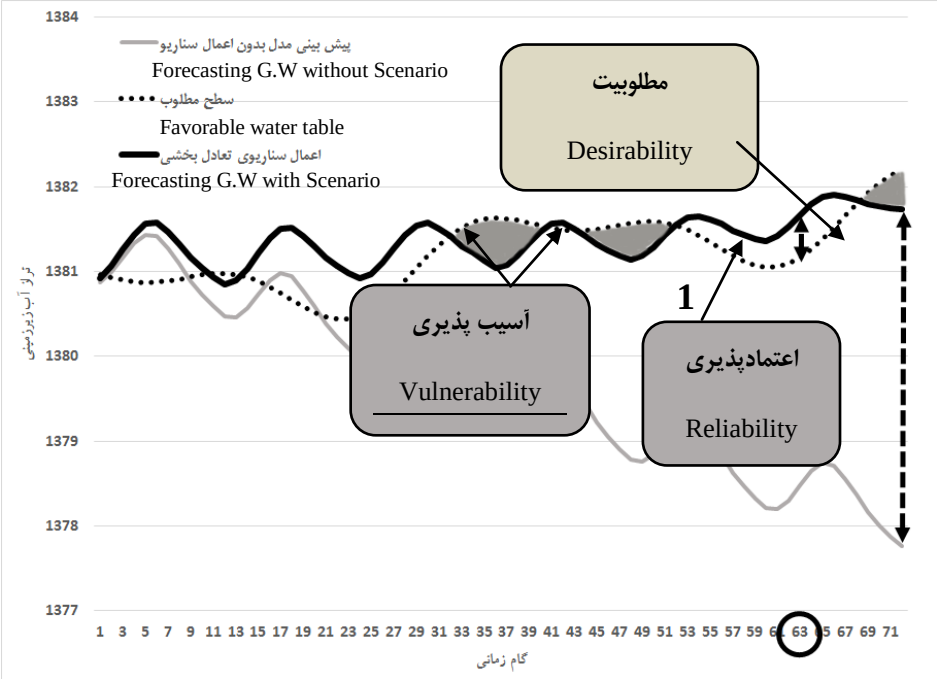
$$\rho_{EL} = \sqrt[3]{\alpha_{EL}.\beta_{EL}.(1-\gamma_{EL})} \quad (۵)$$

در این رابطه ρ_{EL} شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، α_{EL} شاخص اعتمادپذیری، β_{EL} شاخص مطلوبیت و γ_{EL} شاخص آسیب‌پذیری است.

مدل‌سازی آبخوان

استفاده از مدل جهت بررسی رفتار یک سیستم در شرایط فعلی و آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا به منظور شبیه‌سازی اثر سناریوی کاهش برداشت آب در طرح تعادل‌بخشی و ارزیابی شاخص‌های پایداری آبخوان از مدل MODFLOW 2000 با استفاده از نرم‌افزار GMS v6 استفاده شد. وضعیت فعلی اقلیمی و مدیریتی آبخوان در یک دوره ۹ ساله (۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۴-۱۳۹۳) مدل‌سازی شد. استفاده از مدل مفهومی آبخوان با توجه به قابلیت توزیعی بودن نتایج، می‌تواند اثربخشی آبخوان را در هر بخش از آبخوان نشان دهد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، یک دوره ۱۰ ساله برای پیش‌بینی و اثر سناریوهای تعادل‌بخشی استفاده شد. دوره ۱۰ ساله با توجه به افق ۱۴۰۴ طرح تعادل‌بخشی (۱۲) انتخاب شد. دوره آماری مدل‌سازی شامل ۶ سال برای واسنجی (۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۱-۱۳۹۰) و ۳ سال برای صحت‌سنجی مدل تا سال آبی ۹۴-۹۳ مورد استفاده قرار گرفت. گام زمانی شبیه‌سازی بصورت ماهانه و مهرماه ۱۳۸۵ با توجه به کمترین تغییرات تراز آب، کمترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده‌های موجود برای شبیه‌سازی حالت ماندگار مدل انتخاب شد. مدل ماندگار در واقع بیانگر اولین گام زمانی مدل‌سازی است که براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی می‌بایست در آن پارامتر هدایت هیدرولیکی واسنجی شود.

هدف از مدل‌سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه واسنجی می‌باشد. اولین گام مدل‌سازی تهیه مدل مفهومی آبخوان بیرجند می‌باشد که بر مبنای منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، تبخیر و تعرق و همچنین استراتیگرافی آبخوان آماده می‌شود.



شکل ۳- شاخص‌های پایداری آبخوان با استفاده از هیدروگراف بدون اعمال سناریو، شبیه‌سازی سناریو و تراز مطلوب

Figure 3- Sustainability Indicators of groundwater hydrograph for business as usual, simulation of the scenario and desired water level

نفوذ از بارندگی، نفوذ ناشی از جریانات برگشتی کشاورزی و شرب، نفوذ از رواناب سطحی، تغذیه ناشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که بصورت جبهه‌های با بار ثابت (GHB[1]) در نظر گرفته شد به عنوان پارامترهای تغذیه مدل‌سازی اعمال شد. همچنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق در خروجی آبخوان که سطح آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر است، جبهه‌های خروجی آب زیرزمینی که بصورت جبهه‌های با بار ثابت (GHB) در نظر گرفته شد به عنوان پارامترهای تخلیه مدل‌سازی وارد مدل شد. در واقع کلیه عوامل تأثیرگذار و مؤثر بر وضعیت هیدرولیکی آبخوان بایستی در نظر گرفته شود. به منظور شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی شبکه‌بندی آبخوان بصورت شبکه ۲۵۰ * ۲۵۰ متر مربع وارد مدل MODFLOW گردید. جدول (۱) خلاصه‌ای از پارامترهای بیلان آب زیرزمینی است که با محاسبه این پارامترها، میزان تغذیه ناشی از بارندگی و رواناب منطقه با تقسیم‌بندی آبخوان از نظر کاربری اراضی و شبکه جریان برآورد و در مدل مفهومی وارد شد.

پس از ورود کلیه پارامترهای بیلان آب زیرزمینی به مدل مفهومی، شبیه‌سازی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. شبیه‌سازی در حالت ماندگار در اولین گام زمانی مربوط به مهرماه سال ۱۳۸۵ و پس از آن شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار با تعریف ۱۰۸ گام زمانی ماهانه تا سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ انجام گرفت. پارامترهای ورودی به مدل مفهومی شامل تغذیه آبخوان، بهره‌برداری از منابع برداشت آبخوان، جبهه‌های ورودی و خروجی، تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و ... بصورت سری زمانی ۹ ساله وارد مدل آب زیرزمینی و شبیه‌سازی انجام شد. پس از مدل‌سازی آبخوان جهت پیش‌بینی و ارزیابی شاخص‌های پایداری آبخوان دو مرحله واسنجی، صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی در حالت ماندگار و غیرماندگار و آنالیز حساسیت پارامترهای آبخوان دو پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آبدهی ویژه آبخوان برای حالت غیرماندگار جهت واسنجی انتخاب می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی

یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل جهت بدست آوردن نتایج بهینه می‌باشد. با توجه به اجرای مدل و آنالیز حساسیت مدل، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه به عنوان عوامل حساس در مدل ماندگار و غیرماندگار مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه از لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایشات

1- General head package

پمپاژ و برآورد قابلیت انتقال و مطالعات پیشین نیز جهت تطبیق نتایج استفاده شد. واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی بگونه‌ای انجام پذیرفت که حداقل خطای ممکن بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برقرار باشد.

جدول ۱- خلاصه بیلان آب زیرزمینی محدوده آبخوان بیرجند

Table 1- Abstract of water balance in birjand aquifer

تغذیه Recharge(MCM)					تخلیه Discharge(MCM)				تغییرات حجم مخزن Variation of volume
نفوذ از ارتفاعات Infiltration from Mountain	جریان سطحی Run off	برگشتی کشاورزی Flow back from Agriculture	برگشتی از آب شرب و صنعت Flow back from supply and industrial	جمع Sum	برداشت از چاه، چشمه و قنات Discharge well, spring and qanat	تبخیر از آب زیرزمینی Evaporation from G.W	خروجی از آب زیرزمینی Outflow G.W	جمع Sum	
52.77	12.2	17.08	14.88	96.93	104	0	3	107	-10.1

مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در طول دوره مدل‌سازی اختلاف کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد که در مجموع خطای مدل کمتر از ۱ درصد می‌باشد. جدول (۲) میزان خطای مدل نهایی ماندگار و غیر ماندگار برای آبخوان بیرجند را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل خطا حاکی از دقت مناسب مدل برای مدل‌سازی غیرماندگار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که میانگین مجذور خطا یعنی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده با تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در کلیه ۱۲ پیزومتر مدل کمتر از ۲۱ سانتی‌متر است. پس از واسنجی مدل ماندگار در آبخوان بیرجند، شبیه‌سازی اولیه و پس از آن واسنجی مدل کمی آبخوان برای پارامتر آبدهی ویژه (Sy[1]) آبخوان برای مدت زمان ۶ سال انجام و پس از آن برای صحت‌سنجی دوره ۳ سال بعد انتخاب شد. مقدار خطای مدل در حالت غیرماندگار مطابق جدول (۲) ارائه شد. در حالت غیرماندگار میانگین مجذور خطا بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده با شبیه‌سازی شده در کلیه پیزومترهای آبخوان در طی ۶ سال کمتر از ۸۴ سانتی‌متر می‌باشد که دقت مناسب مدل را برای صحت‌سنجی و پیش‌بینی نشان می‌دهد.

از ضروریات استفاده از یک مدل مناسب، کنترل و بررسی رفتار مدل در مقابل برداشت‌ها و اطلاعات زمان‌های گذشته است که بایستی تطابق کافی بین نتایج مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل وجود داشته باشد. طول زمان تطابق جهت صحت‌سنجی بستگی به دو عامل نوع آبخوان و سیر تاریخی آبخوان دارد. بدین منظور از صحت‌سنجی مدل غیرماندگار برای سه سال پایانی مدل‌سازی حاکی از دقت مناسب جهت پیش‌بینی وضعیت آتی آبخوان را نشان می‌دهد. شکل (۴) صحت‌سنجی نتایج را برای سال پایانی (سال نهم) مدل‌سازی نشان می‌دهد. نتایج مناسب صحت‌سنجی حاکی از دقت مناسب مدل در فرآیند واسنجی است. نتایج صحت‌سنجی نشان دهنده حداقل اختلاف بین تراز آب در شبیه‌سازی و مشاهداتی است و کلیه نقاط پیرامون خط مبنا می‌باشد.

جدول ۲- میزان خطای مدل کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار

Table 2- Error in Quantitative model in steady and Un-steady

پارامتر خطا Error parameter	مدل ماندگار Steady model	مدل غیرماندگار Un-steady model
میانگین خطا Mean Error	0.048	-0.038
میانگین مطلق خطا Abs Error	0.169	0.581
میانگین مجذور خطا RMSE[2]	0.211	0.835

پیش‌بینی و تعیین تراز آستانه آب زیرزمینی

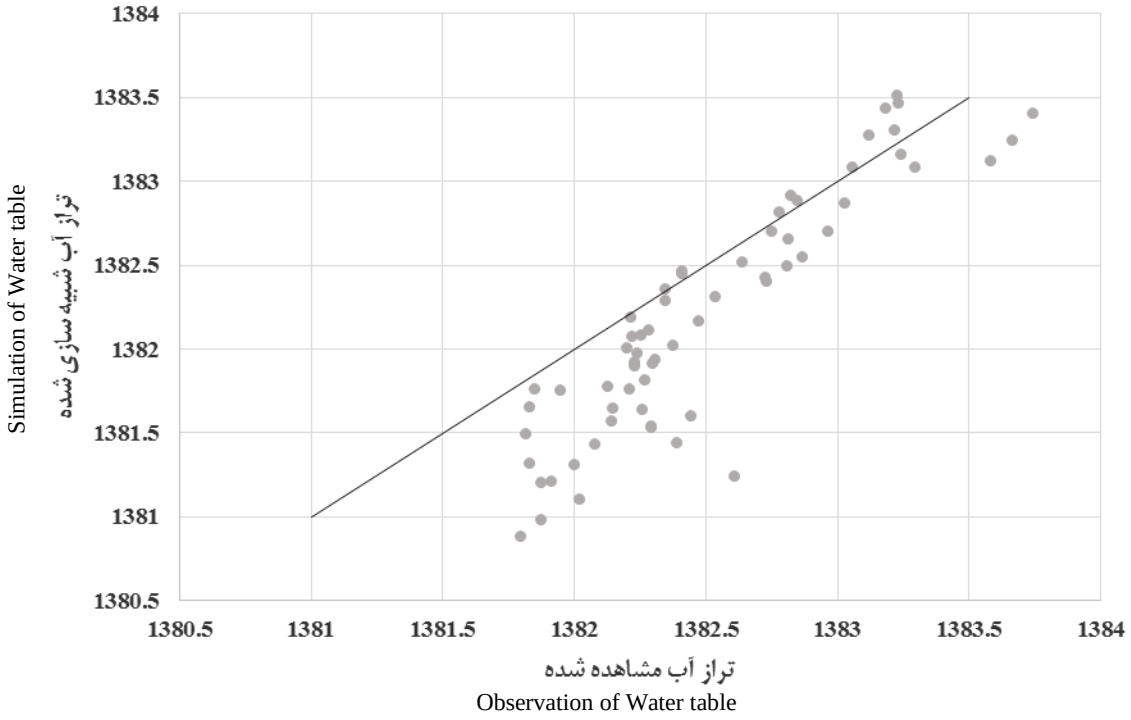
پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی آبخوان با در نظر گرفتن تکرار شرایط گذشته برای آینده، انجام گرفت. نتایج خروجی از پیش‌بینی مدل تا سال ۱۴۰۴ که یک دوره ۱۰ ساله می‌باشد بصورت شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو معرفی شده است که نتایج هیدروگراف حاکی از ادامه افت آبخوان با روند افزایشی نسبت به دوره‌های قبل تحت شرایط نرمال می‌باشد.

به منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی و تعیین روند تغییرات افت آب در هر پیزومتر و کل آبخوان، تحلیل روند افت آب زیرزمینی

1- Specific yield

2- Root mean square error

انجام گرفت. هدف طرح تعادل‌بخشی تأمین کسری مخزن و رسیدن تراز آب زیرزمینی به تراز اولیه می‌باشد. در آبخوان بیرجند در طی ۹ سال مدل‌سازی تراز آبخوان از ۱۳۸۵/۴ متر به ۱۳۸۰/۸ رسیده که نشان‌دهنده‌ی افت ۴/۶ متر می‌باشد. این تغییرات افت در پیزومترهای آبخوان، از افت ۱۰ متر در پیزومتر تقاب که در مرکز آبخوان قرار دارد تا بالازدگی ۶۰ سانتی‌متری آب در خروجی آبخوان حاکی است.



شکل ٤- نتایج صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان

Figure 4- Validation in Quantitative model

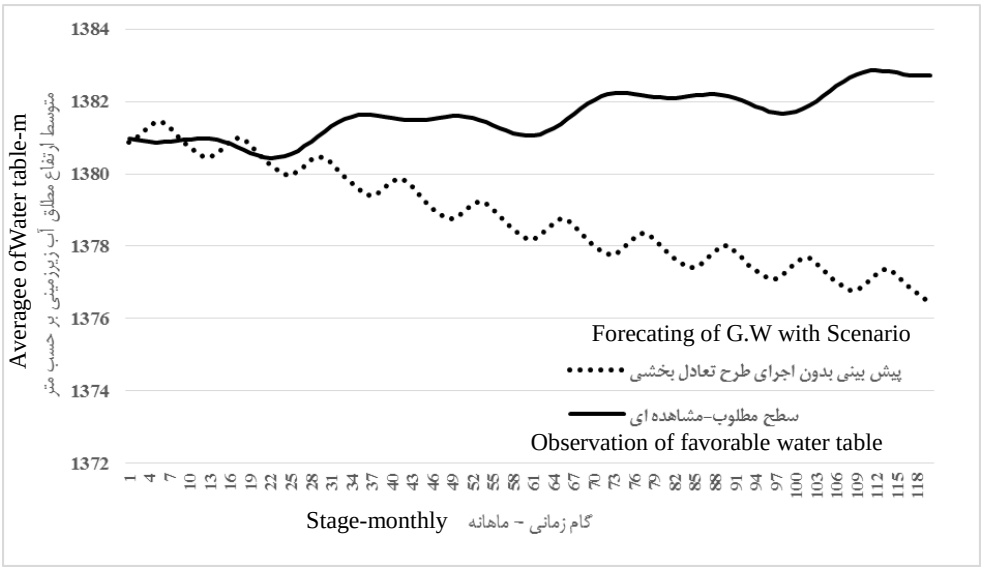
رفتار تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریوی تعادل‌بخشی، با تناوب و روند کاهشی همراه بوده که به منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت ارزیابی شاخص در اعمال سناریوهای تعادل‌بخشی از برازش سری فوریه و روند افت آب زیرزمینی استفاده شد. بدین منظور با استفاده از سری زمانی ثبت شده و برازش آن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تابع سری فوریه استخراج و با تحلیل شیب روند سری زمانی تراز آب، تراز مطلوب آب زیرزمینی بدست آمد. سپس میزان تراز مطلوب جهت ارزیابی شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. رابطه (۶)، منحنی برازش داده شده تراز مطلوب برای کل آبخوان را نشان می‌دهد. مشابه این رابطه برای هر چاه مشاهده‌ای در آبخوان، تراز مطلوب جهت ارزیابی شاخص پایداری سیستم برآورد شد که حداکثر خطای برآورد تراز مطلوب با استفاده از سری فوریه ۸ سانتی‌متر تعیین شد. شکل (۵) تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان به همراه تراز مطلوب نیز ارائه شده است. تحلیل نتایج هیدروگراف نشان می‌دهد که ادامه روند بهره‌برداری از آبخوان طی ۱۰ سال آینده اختلاف نزدیک به ۵ متر بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و تراز مطلوب را برآورد کرده است. در این پیش‌بینی تنها ادامه روند کنونی بهره‌برداری از آبخوان مورد نظر بوده است.

ارزیابی پایداری فنی سناریوی کاهش برداشت از آب زیرزمینی

به منظور اجرای طرح تعادل‌بخشی در آبخوان بیرجند، ۶ سناریوی کاهش برداشت از آب زیرزمینی در طی دوره‌ی پیش‌بینی ۱۰ ساله در مدل اعمال شد. سناریوهای کاهش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری بصورت کاهش ۱، ۱/۵، ۲ ، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد وارد مدل مفهومی آبخوان شد. با تعریف سناریوی کاهش برداشت آب از آبخوان، میزان آب برگشتی در بخش کشاورزی محاسبه و این حجم از میزان تغذیه آبخوان کسر و در مدل مفهومی اعمال شد. کاهش برداشت از آب زیرزمینی فقط برای چاه‌های کشاورزی در مدل در نظر گرفته شد. این سطوح کاهش بهره‌برداری به منظور اجرای تعادل‌بخشی انتخاب شد و کاهش بهره‌برداری در هر سال در مدل اعمال شد. همچنین به منظور برآورد پایداری سیستم آبخوان بیرجند تحت سناریوهای تعادل‌بخشی

براساس سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت آبخوان برای هر چاه مشاهده‌ای و کل آبخوان بدست آمد.

$$WT = 1382 + 0.356*\cos(0.165X) + 0.148*\sin(0.165X) + 0.106*\cos(0.33X) - 0.114*\sin(0.33X) - 0.11*\cos(0.495X) - 0.087*\sin(0.495X) \quad (۶)$$



شکل ۵- تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان در طی ۱۰ سال پیش‌بینی به همراه تراز مطلوب آب زیرزمینی

Figure 5- Groundwater level changes predicted over the next 10 years with a favorable balance of groundwater

جدول (۳) نتایج شاخص‌پایداری آبخوان در ۶ سطح کاهش برداشت آب برای پیزومترها و کل آبخوان را نشان می‌دهد. لذا بیان شاخص برای هر پیزومتر، با توجه موقعیت مکانی اثربخشی سناریو حائز اهمیت است. براساس نتایج بدست آمده در محدوده چاه مشاهده‌ای خوسف و جنوب بجد در سطوح مختلف کاهش برداشت میزان پایداری ۱۰۰ درصد بدست آمده و در سایر چاه‌های مشاهده‌ای میزان شاخص پایداری با افزایش سطح برداشت، افزایش داشته است بطوری‌که بیشترین تأثیر کاهش برداشت در چاه مشاهده‌ای شمال شاهزیله مشاهده شد که میزان پایداری ۹ درصد در سناریوی کاهش یک درصد به میزان پایداری ۱۶ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد می‌رسد. شکل (۶) هیدروگراف ناشی از اعمال ۶ سناریو با وضعیت بدون اعمال سناریو در مقایسه با تراز مطلوب تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح کاهش برداشت تراز هیدروگراف آبخوان افزایش داشته و در سناریوهای کاهش ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصد برداشت آب تراز آب زیرزمینی بالاتر از تراز مطلوب آبخوان قرار می‌گیرد.

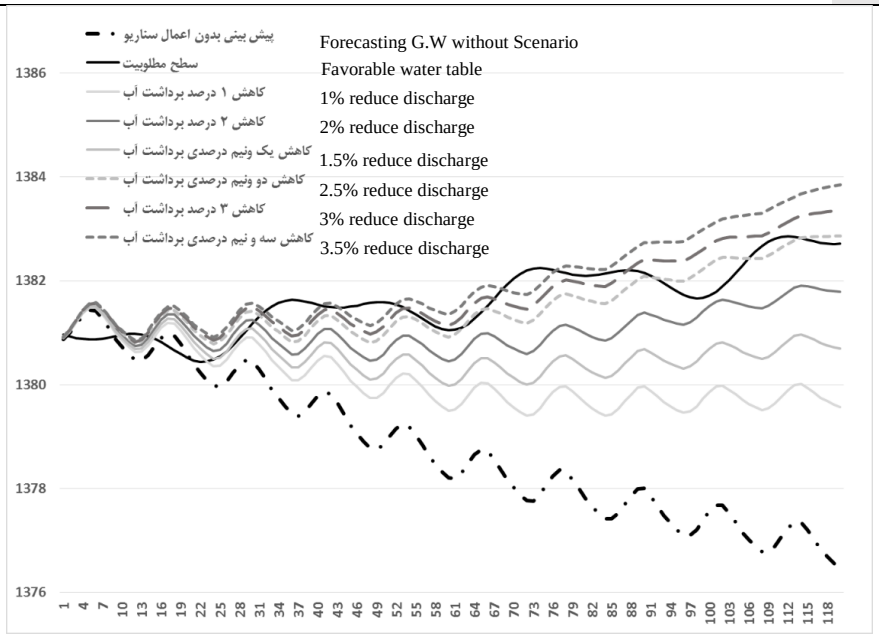
بررسی شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با استفاده از ۶ سناریوی در طرح تعادل‌بخشی نشان داد که با کاهش برداشت آب، میزان شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی افزایش یافته به‌طوری‌که از میزان ۳۲ درصد در اولین سطح (کاهش ۱درصد برداشت) به ۸۸ درصد (کاهش ۳/۵ درصد برداشت) رسیده است (شکل (۷)). همچنین بررسی شاخص مطلوبیت نشان می‌دهد که کاهش ۲/۵ درصدی برداشت آب از آبخوان، بازگشت آبخوان به حالت اولیه (تراز مبنای تعادل‌بخشی) را به‌همراه خواهد داشت. همچنین با کاهش برداشت آب از سفره‌ی آب زیرزمینی، میزان شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت در هر پیزومتر بهبود یافته است. در چاه‌های مشاهده‌ای میانی آبخوان (شمال شاهزیله، شمال محمدیه و شمال رکات)، که تحت تأثیر زیاد برداشت آب هستند شاخص پایداری آبخوان با اعمال سناریوهای کاهش برداشت آب، مقدار کمی بهبود داشته که ناشی از اثر تخلیه بالای حجم آب روی تراز آب این بخش از آبخوان است. میزان شاخص پایداری در چاه مشاهده‌ای تقاب که در مرکز آبخوان واقع است از ۳۲ درصد در سناریوی کاهش یک درصد برداشت آب به ۹۴ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد مصرف آب رسیده است. این میزان در سایر چاه‌های مشاهده‌ای نیز افزایش داشته و در پیزومترهای میانی آبخوان با توجه به حجم بالای منابع تخلیه آب، رشد کمتری داشته است. شاخص آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که کاهش برداشت آب سبب کاهش این شاخص شده به‌طوری‌که در چاه مشاهده‌ای شمال محمدیه از ۰/۶۵- به ۰/۱۷- رسیده است. بیشترین میزان آسیب‌پذیری در اعمال سناریوهای کاهش برداشت آب در چاه مشاهده‌ای که در پایین دست چاه‌های بهره‌برداری واقع شده است، مشاهده شد. به‌طوری‌که چاه مشاهده‌ای فدشک با اعمال سناریوی کاهش برداشت از یک درصد تا ۳/۵ درصد تنها ۱۶ درصد و نصرآباد تنها ۲۵ درصد بهبود شاخص آسیب‌پذیری را داشته است. بررسی مطلوبیت سیستم آب زیرزمینی نیز نشان داد که در چاه‌های

مشاهده‌ای ابتداء و انتهای آبخوان که کمتر تحت تـأثیر منـابع تخلیـه آبخوان هستند و تغییرات تراز آب زیرزمینی کمتری را دارند سریع‌تر به تراز مطلوب رسیده و در چاه‌های مشاهده‌ای میانی آبخوان، دارای روند کندتر می‌باشد.

جدول ۳- ارزیابی پایداری آبخوان با سطوح کاهش یک، ۲/۵ و ۳/۵ درصد برداشت آب

Table 3- Evaluation Sustainability Analysis by 1,2.5 and 3.5 percent reduce discharge

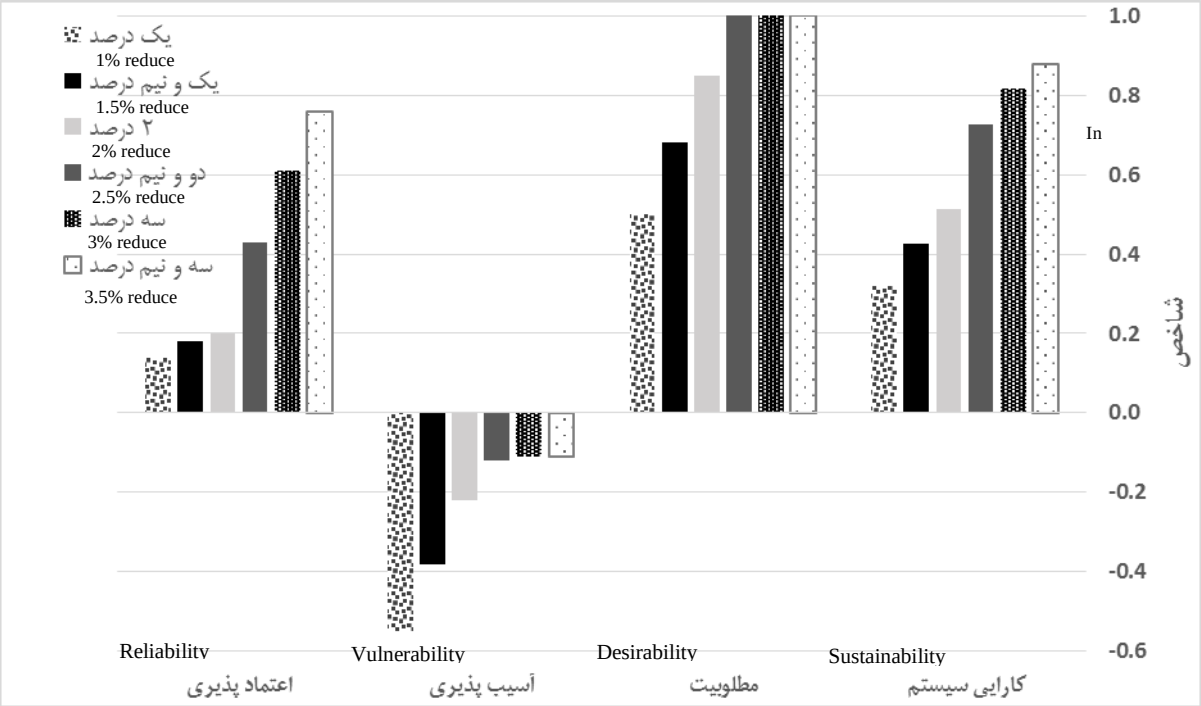
سناریو و شاخص Scenario / نام پیزومتر Pizometer	سناریوی کاهش یک درصد 1% reduce				سناریوی کاهش دو و نیم درصد 2.5 % reduce				سناریوی کاهش سه و نیم درصد 3.5% reduce			
	اعتمادپذیری Reliability	آسیب پذیری Vulnerability	مطلوبیت Desirability	پایداری سیستم Sustainable system index	اعتمادپذیری Reliability	آسیب پذیری Vulnerability	مطلوبیت Desirability	پایداری سیستم Sustainable system index	اعتمادپذیری Reliability	آسیب پذیری Vulnerability	مطلوبیت Desirability	پایداری سیستم Sustainable system index
اراضی شمس آباد- shamsabad	0.06	-0.66	0.40	0.20	0.11	-0.29	0.84	0.41	0.13	-0.18	0.97	0.47
تقاب- Taghab	0.11	-0.49	0.54	0.32	0.69	-0.11	1.00	0.85	0.87	-0.05	1.00	0.94
جنوب حاجی اباد-HajiAbad	0.10	-0.69	0.34	0.22	0.16	-0.35	0.72	0.43	0.19	-0.24	0.84	0.50
جنوب بجد- Bojd	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
خوسف- Khosf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
شمال شاهزیله- Shahzileh	0.01	-0.77	0.29	0.09	0.01	-0.52	0.60	0.15	0.01	-0.45	0.69	0.16
شمال محمدیه- Mohamadiyeh	0.01	-0.65	0.42	0.12	0.01	-0.26	0.87	0.19	0.09	-0.17	1.00	0.42
کنار سپاه-Sepah	0.61	-0.31	0.69	0.66	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
نصرآباد- NasrAbad	0.15	-0.49	0.55	0.35	0.61	-0.20	1.00	0.79	0.76	-0.24	1.00	0.83
فدشک- Fedeshk	0.43	-0.81	0.25	0.28	0.48	-0.68	0.44	0.41	0.48	-0.65	0.49	0.44
شمال رکات- Rekat	0.01	-0.65	0.42	0.12	0.01	-0.27	0.87	0.19	0.06	-0.17	1.00	0.37
نوفرست- Noferest	0.81	0.00	1.00	0.93	0.93	0.00	1.00	0.98	0.93	0.00	1.00	0.98
آبخوان- Aquifer	0.14	-0.55	0.50	0.32	0.43	-0.12	1.00	0.73	0.76	-0.11	1.00	0.88



شکل ٦- هیدروگراف آب زیرزمینی تحت اعمال ٦ سناریو با تراز مطلوب

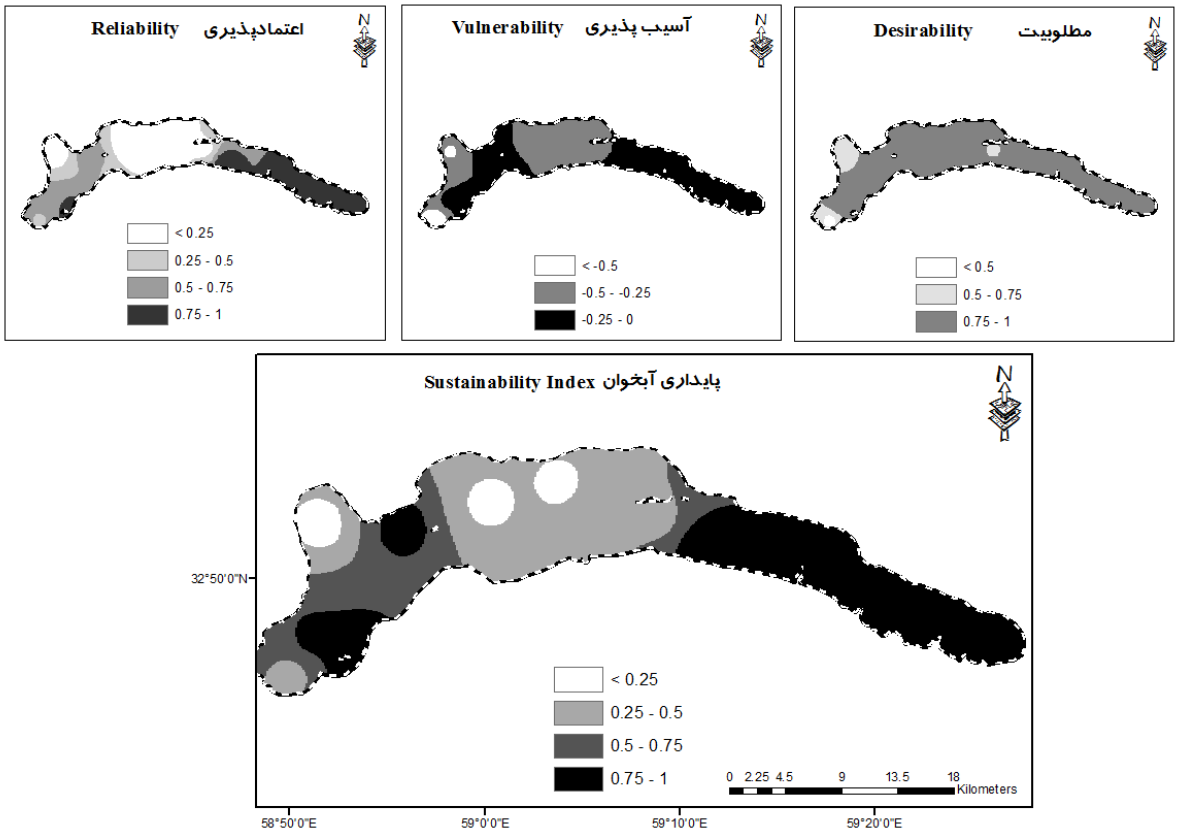
Figure 6- Groundwater hydrograph under Acts 6 scenarios with favorable balance

بطورکلی نتایج نشان می‌دهد که پیزومترهای ابتدایی (شرق آبخوان) آبخوان که تحت تأثیر منابع تخلیه آب زیرزمینی قرار ندارند تغییرات کمتری در پایداری آبخوان دارند و حساسیت کمتری را نسبت به سناریوهای مختلف نشان می‌دهند. شش پیزومتر میانی آبخوان (پیزومتر تقاب، پیزومتر شمس‌آباد، پیزومتر شمال شاهزیله، شمال محمدیه، شمال رکات و کنارسپاه) که تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری قرار دارد با کاهش برداشت، افزایش پایداری سیستم را نشان داده که در این بین چاه‌های مشاهده‌ای بالادست تغییرات کمتری را نسبت به پایین دست دارند. بررسی پایداری سیستم آب زیرزمینی تحت ۶ سناریوی کاهش برداشت آب در شکل (۷) ارائه شده است. اعمال ۲/۵ درصد کاهش برداشت آب زیرزمینی بصورت توزیعی در آبخوان، توانسته سطح آب زیرزمینی را به تراز مطلوبیت متناسب با هدف طرح تعادل‌بخشی آبخوان، نزدیک کند. نتایج نشان داد که با اعمال ۲/۵ درصد کاهش برداشت آب از آبخوان، مطلوبیت سیستم تأمین شده که این مقدار به مفهوم رسیدن سطح آب زیرزمینی آبخوان به تراز مطلوب تعریف شده‌ی آبخوان است. در شکل (۸) میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی را با استفاده از سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت بصورت توزیعی با استفاده از نتایج سناریوی کاهش ۲/۵ درصدی برداشت آب ارائه شده است. نتایج توزیعی نشان می‌دهد که شاخص اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری آبخوان در منطقه میانی آبخوان که محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری است رشد چشمگیری نداشته و پایداری سیستم آب زیرزمینی را در این منطقه نسبت به سایر بخش‌های آبخوان کاهش داده است. همچنین تحلیل توزیعی شاخص نشان می‌دهد که روند افزایشی شاخص در مناطق میانی آبخوان که تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری قرار دارد روند کندتری داشته است. همچنین شاخص پایداری آبخوان در سناریوی کاهش ۱ درصد برداشت از آب چاه‌ها از ۳۲ درصد به شاخص ۸۸ درصد در سناریوی کاهش ۳/۵ درصد می‌رسد.



شکل ۷- شاخص‌های پایداری سیستم آب زیرزمینی در سناریوهای کاهش برداشت

Figure 7- Sustainability Indicators groundwater system in reducing harvest scenarios



شکل ۸- میزان پایداری سیستم آب زیرزمینی بصورت توزیعی در سناریو کاهش ۲/۵ درصد

Figure 8- The sustainability of groundwater system in the distributed scenario decrease 2.5%

نتیجه‌گیری

استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، جهت ارزیابی اثر سناریوهای طرح تعادل بخشی موجب تصمیم‌گیری راحت‌تر در رابطه با بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از مفهوم شاخص انعطاف‌پذیری، شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با تلفیق از سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت ارائه و بکار گرفته شده است. بدین منظور یک تراز مطلوب آب زیرزمینی جهت تصمیم‌گیری و برآورد شاخص با استفاده از سری فوریه و روند افت آب زیرزمینی برای هر چاه مشاهداتی و کل آبخوان تعریف شد. به منظور استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی، ۶ سناریوی تعادل‌بخشی (کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی در سطوح کاهش ۱، ۱/۵، ۲ ، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ درصدی از چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی) با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی و برآورد هیدروگراف آبخوان برای یک دوره ۱۰ ساله، سناریو کاهش برداشت آب در مدل اعمال شد. نتایج مدل با استفاده از شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی برآورد شده و بر اساس آن میزان پایداری سیستم در هر سناریوی تعادل‌بخشی، مورد سنجش قرار گرفت. نتایج برآورد شاخص پایداری سیستم با استفاده از سه شاخص نشان داد که مناطقی که کمتر تحت تأثیر چاه‌های بهره‌برداری هستند حساسیت کمتری داشته و به‌سرعت میزان پایداری سیستم به حد مطلوب (عدد یک حد بالای شاخص است) می‌رسد. در بخش‌هایی از آبخوان که چاه‌های بهره‌برداری قرار دارند، با توجه به حجم بالای برداشت آب تغییرپذیری شاخص‌ها کندتر است. روند تغییرات پایداری سیستم آب زیرزمینی آبخوان نشان می‌دهد که با کاهش ۱ درصد برداشت آب ۳۲ درصد پایداری سیستم افزایش داشته و اگر این میزان به ۳/۵ درصد برسد این میزان افزایش به ۸۸ درصد خواهد رسید.

استفاده از این شاخص‌ها با توجه به قابلیت توزیعی بودن آن امکان توسعه و بهره‌برداری مناسب و بهینه از آبخوان‌ها را فراهم می‌کند. نتایج این تحقیق و ارائه شاخص پایداری سیستم آب زیرزمینی با توجه به بررسی توزیعی اثر سناریو و ارزیابی اثر آن می‌تواند برای آبخوان‌های دیگر با وضعیت مشابه بخصوص برای تعادل‌بخشی مورد ارزیابی و آسیب‌شناسی قرار گیرد.

منابع

1- Alimonti C., and Lombardi M. 2015. Reliability Analysis for Preliminary Forecasts of Hydrogeological Unit Productivity. Water Resource Management , 29:3771–3785.
2- Chaves HML., and Alipaz S. 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. Water Resource Management, 21(5):883–895.
3- Fourier J.B.J. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France VII. 570-604 (1827) (greenhouse effect essay).
4- Frija A., Dhehibi B., Chebil A., and Villholth K.G. 2015. Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. Groundwater for Sustainable Development, 1(1):23-32.
5- Hashimoto T., Stedinger JR., and Loucks DP. 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. Water Resources Research, 10(1):14–20.
6- Juwana I., Perera BJC., and Muttil N. 2009. Conceptual framework for the development of West Java water sustainability index. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns.
7- Loucks DP., and van Beek E. 2005. Water resources systems planning and management, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.
8- Mazza R., La Vigna F., and Alimonti C D. 2014. Evaluating the available regional groundwater resources using the distributed hydrogeological budget. Water Resource Management, 11:1–17.
9- McMahon T. A., Adeloye A. J., and Sen-Lin Z. 2006. Understanding performance measures of reservoirs. Journal of Hydrology, 324: 359–382.
10- Mendoza VM., Villanuave EE., and Adem J. 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. Climate Research Journal, 9:139-145.
11- Ministry of Power. 2011. Prohibition discharge in Birjand plain. (In Persian)
12- Ministry of Power. 2014. Report of Reduction program and balance groundwater. (In Persian)
13- Pandey V., Shrestha S., Chapagain S., and Kazama F. 2011. A framework for measuring groundwater sustainability. Environmental science & policy, 14: 396 – 407.
14- Policy Research Initiative .2007. Canadian water sustainability index. PRI Project Report on Sustainable Development.
15- Safavi HR., Esfahani MK., and Zamani AR. 2014. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandeh-rood River Basin, Iran. Journal of Water Resources Management, 28(6):1671-1688. (In Persian)
16- Safavi HR., and Golmohammadi MH. 2016. Evaluating the Water Resource Systems Performance Using Fuzzy Reliability, Resilience and Vulnerability. Iran-Water Resources Research, 12 (1): 68-83.
17- Sandoval-Solis S., McKinney DC., and Loucks DP. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management, 137(5):381-390.
18- Shahedi M., and Talebi Hossein Abad F. 2014. Introducing some indices to evaluate the balance of water resources and sustainable development. Journal of Water and Sustainable Development, 1(1):73-79. (In Persian)
19- Todd DK., and Mays LW. 2005. Groundwater hydrology, 3rd edn. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 6, Jan.-Feb. 2018, p. 1587-1601

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۶، ص. ۱۶۰۱-۱۵۸۷

Quantitative Sustainability Analysis of Aquifer System (Case Study: South Khorasan- Birjand Aquifer)

H. Kardan Moghaddam[1]- M. E. Banihabib[2]*- S. Javadi[3]

Received: 25-09-2017
Accepted: 04-12-2017

Introduction: Groundwater is predominantly a renewable resource, and when managed properly can ensure a long-term water supply for increasing water demand and for climate change impacted region. Surface water renews as part of the hydrologic cycle in an average time period ranging from approximately 16 days (rivers) to 17 years (lakes and reservoirs); however, the average renewal time for groundwater is approximately 1400 years for aquifers to millions years for some deep fossil groundwater. Groundwater depletion, which is the reduction in the volume of groundwater storage, can lead to land subsidence, negative impacts on water supply, reduction in surface water flow and spring discharges, and loss of wetlands. Water balancing strategy has been considered as one of the most effective options to mitigate the groundwater depletion, and thus the balancing scenarios are applied as main approach to manage ground water sustainably. The purpose of the water balancing strategy in aquifers management is that groundwater level to be returned to the primary water level and to compensate the water resources shortage of aquifers' storage.

Materials and Methods:

1. Case study: Birjand aquifer with an area of 1100 square kilometers is situated in eastern part of Iran. The location of the aquifer is between 59^o 45 and 58^o 43 east longitude, and 33^o 08 and 32^o 34 north latitude.

2. Modeling: Laplace Equation is the basic equation for groundwater flow study in steady or unsteady states. In simulation by using numerical models, the boundary of the model, recharge and discharge resources, evaporation and recharge zones are important elements. After finding the key components of the conceptual model, the MODFLOW software was applied for simulation of groundwater. MODFLOW, which is a computer code that solves the groundwater flow equation and uses finite-difference method, is provided by the U.S. Geological Survey.

3. Sustainability Analysis: In order to achieve the objective of this study, water balancing scenarios should be evaluated for sustainability of the groundwater system using appropriate indices. Here, three indicators of reliability, vulnerability and desirability are proposed and were employed to assess the stability of groundwater system in different balancing scenarios in lumped and distributed forms. The aquifer sustainability index is expressed in Equation 4. In this equation, three indicators of aquifer reliability (Equation 1), aquifer vulnerability (Equation 2) and Desirability (Equation 3) have been used to assess the stability of groundwater system. The aquifer reliability index means in what extent the withdrawal scenario has been able to return the aquifer to its original state using the Equation 1 as follows:

$$\alpha_{EL} = \frac{n_{EL}}{N_{EL}} \qquad (1)$$

In which n_{EL} the number of periods where the groundwater level is above the desired level (equilibrium balance) and N_{EL} the total number of time steps in simulation. The vulnerability index indicates the amount of shortage in the groundwater storage and expresses the severity of the system failures using the Equation 2 as follows:

$$\gamma_{EL} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(W_s - W_t)}{\sum_{i=1}^{n}(W_t - W_{\Pr})} \qquad (2)$$

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate, Water Resources Engineering and Associate Professors of Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: banihabib@ut.ac.ir)

In this equation, W_t the desired groundwater level at time step t, W_s the groundwater level simulated in t time period for each scenario, $W_{\Pr}$ the groundwater level without scenarios and n the number of periods where the groundwater level is lower than the desired level. The index of the likelihood of returning the system to a favorable state is presented as an indicator of the desirability of the system using the Equation 3 as follows:.

$$\beta_{EL} = 100 * (\frac{R_{EL} - r_{EL}}{R_{EL} - R_{pr}}) \quad (3)$$

In this equation, r_{EL} indicates the f ground water level after the depletion, R_{EL} is the desired level of groundwater and R_{pr} is the groundwater level (without the scenario). After estimating three indicators of reliability, vulnerability and desirability, the sustainability index for each scenario can be appraised using Equation 4.

$$\rho_{EL} = \alpha_{EL}.\beta_{EL}.(1-\gamma_{EL}) \quad (4)$$

In this equation, ρ_{EL} groundwater sustainability index, α_{EL} reliability index, β_{EL} desirability index and γ_{EL} vulnerability index.

Results and Discussion: In this study, six water balancing strategies were employed to reduce 1, 1.5, 2, 2.5, 3 and 3.5 percent water withdrawing for agricultural water use. Results of the simulation of different water balancing strategies demonstrated that with reducing in water use, the stability index has been improved significantly. The improvement changes from 32% increase in the index for 1% water withdrawing reduction scenario to 88% increase in the index for the 3.5% water withdrawing reduction scenario. Moreover, the reviewing of the stability indices of the system in various scenarios reveals that a 2.5% reduction in water use will assistance the aquifer status achieve to a stable state.

Conclusion: In order to manage groundwater withdrawal, it is easier to assess the impact of the water balancing scenarios using the groundwater sustainability index. The review of sustainability indices in the studied aquifer shows that by reducing 1% of the water harvest, 32% of the system's stability increases, and if water harvest reduction reaches 3.5%, the index increases 88%. Considering the distributed potential and possibility of the investigation of different scenarios by proposed indices in this study, they can be applied to assess and manage other similar aquifers.

Keywords: Desirability, Desired water table, Reliability, Sustainable system index, Vulnerability